

# 視認性と品質を考慮した 二次元コードのモジュールパターン最適化

田尻 昌之<sup>1,a)</sup> 谷山 大介<sup>1</sup> 小野 智司<sup>1,b)</sup> 中山 茂<sup>1,c)</sup>

**概要:** 二次元コードの視認性と品質を考慮した装飾手法を提案する。先行研究では画像と二次元コードの重畳による装飾化手法が提案されている。これは二次元コードを構成するリードソロモン符号の誤り訂正機能によるものである。本研究では、二次元コードを構成するモジュールパターンを、あらかじめ用意したイラストに類似するように作り換える事で視認性を高める手法を提案する。同時に、二次元コードのデコードに不利なモジュールパターンの発生条件を考慮することで、視認性と品質の両方を考慮した装飾化を実現する。

**キーワード:** 二次元コード, QR コード, 進化計算, 遺伝的アルゴリズム

## Module Pattern Optimization of a Two-Dimensional Barcode Based on Machine-Readability and Appearance

MASAYUKI TAJIRI<sup>1,a)</sup> DAISUKE TANIYAMA<sup>1</sup> SATOSHI ONO<sup>1,b)</sup> SHIGERU NAKAYAMA<sup>1,c)</sup>

### **Abstract:**

We propose a decoration method for two-dimensional(2D) barcodes based on bi-objective optimization. Although several decoration methods by superposing an image on the 2D code have been proposed to enhance visual attractiveness of the code, the robustness against stains of the decorated code is deteriorated. The proposed method arranges module patterns of 2D code to maximize both the similarity between the module pattern and a given objective image and machine-readability.

**Keywords:** Two-dimensional Code, QR Code, Evolutionary Computation

## 1. はじめに

二次元コードは本来、生産や物流、販売などの場面で物品の管理に用いられてきた [1]。カメラ付携帯電話・PHS 端末内蔵カメラ等による二次元コードの読み取りが可能となった現在、雑誌や広告ポスターなどの印刷媒体や Web 画面での携帯端末向けサイトへの誘導、名刺などに個人デー

タを格納したものを添付しアドレス登録の効率化などの場面でも使用されている。しかし、二次元コードは実際に読み取るまでどのようなデータが埋め込まれているのか知ることができない、また単調なデザインにより広告媒体として視認性不足という問題点があった。

そのなかで近年、二次元コードシンボル上に写真やイラストが組み込まれたものが用いられている [2-4]。これは、読み取る前から内包データの識別、視認性の向上、オリジナリティの演出を目的としている。先行研究では、作成システムの開発を行うことにより、効率的かつ手軽にイラスト入り二次元コードの作成が可能となった。また、二次元コードを構成するモジュールパターン生成による装飾化方式も提案されている。

<sup>1</sup> 鹿児島大学理工学研究科  
Department of Information Science and Biomedical Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University Korimoto 21-40, Kagoshima, 890-0065 Japan

a) sc107028@ibe.kagoshima-u.ac.jp

b) ono@ibe.kagoshima-u.ac.jp

c) shignaka@ibe.kagoshima-u.ac.jp

先行研究の方式では二次元コードの誤り訂正機能を用いている。誤り訂正機能とは、シンボルの汚れ・欠損等でデコードできない未知の情報から、本来の正しいデータを読み取るための機能である。画像の重量による装飾化方式では、二次元コード本来の誤り訂正能力の低下という問題点がある。モジュールパターン生成方式による装飾化では、効率的なモジュールパターンの生成法における問題がある。また、モジュールバーン生成方式による装飾化では、デコードを高速に行うためのモジュール数の均一化に関しては考慮されていない。

本研究では、進化計算を用い、効率的に二次元コードのモジュールパターンを生成する事で、二次元コードの視認性、視覚的誘因性を向上を図る。同時に、従来考慮されていなかった、シンボル上の好ましくないモジュールパターンの発生を防ぐことを評価に加えた二次元コード生成を行うシステムを提案する。

## 2. 関連研究

### 2.1 QRコード

QRコード [1] は一次元コードとは異なり縦横に2次元の情報を持つため、数字だけでなく英字や漢字データなども格納可能となっている。濃淡がデコーダにより判別可能なものであれば、彩色も可能である。また後述の誤り訂正機能を用いることにより、QRコードの一定量のデータ欠損があった場合でもデータの修復を行い、読み取り可能とすることができる。以下にQRコードの概要を示す。

#### 2.1.1 構成要素

QRコードシンボル上での要素の位置を図1に示す。

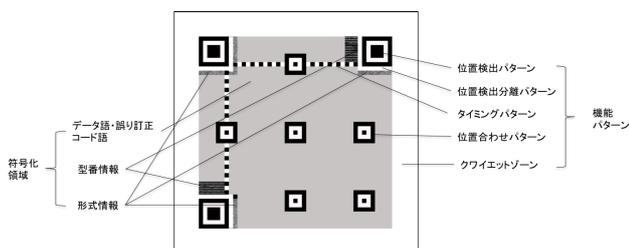


図1 シンボルの構成要素

#### 2.1.2 用語

- **モジュール**：シンボルを構成する単位セル。1ビットが1モジュールに相当する。
- **型番**：1型 (21 × 21 モジュール) ~ 40型 (177 × 177 モジュール) 間において、番号で示されるシンボルの大きさ。
- **訂正レベル**：2.1.3 節を参照
- **マスク処理**：明モジュール及び暗モジュール数を均一化し、画像の高速処理の障害となるパターンの発生を抑えるために行う処理。8種類のマスクパターンの中で失点の最小となるものを選ぶ。失点に関しては3.4.2

	データコード語						誤り訂正コード語							
RSブロック1	D1	D2	D3		D41	D42	D43	E1	E2	E3		E26	E27	E28
RSブロック2	D44	D46	D47		D85	D86	D87	E29	E30	E31		E54	E55	E56
RSブロック3	D88	D89	D90		D128	D129	D130	E57	E58	E59		E82	E83	E84
RSブロック4	D131	D132	D133		D171	D172	D173	E85	E86	E87		E110	E111	E112
RSブロック5	D174	D175	D176	...	D214	D215	D216	E113	E114	E115	...	E138	E139	E140
RSブロック6	D217	D218	D219		D257	D258	D259	E141	E142	E143		E166	E167	E168
RSブロック7	D260	D261	D262		D300	D301	D302	E169	E170	E171		E194	E195	E196
RSブロック8	D303	D303	D304		D342	D343	D344	D345	E197	E198	E199	E222	E223	E224
RSブロック9	D346	D347	D348		D386	D387	D388	D389	E225	E226	E227	E250	E251	E252
RSブロック10	D390	D391	D392		D430	D431	D432	D433	E253	E254	E255	E278	E279	E280

図2 RSブロック内の構造例 (型番16, 訂正レベルM)

を参照。

- **データコード語**：読み取られるデータ。
- **訂正コード語**：QRコードに汚れなどがある場合でもデータコード語を正確に読み取れるように余分に付加されるビット。後述のReed-Solomon符号(RS符号)における検査符号であり、データコード語および埋め草コード語を主とするコード語から生成される。
- **埋め草コード語**：コード語の総数がシンボルの容量に満たない場合、空のコード語位置を充填する目的で使用される。
- **機能パターン**：復号を補助するシンボル位置の識別、検索特性に必要なシンボルのオーバーヘッド部分。位置検出パターン、タイミングパターン、クワイエットゾーン、位置合わせパターン、位置検出分離パターンで構成される。
- **RSブロック**：図1の符号化領域内の大部分であるデータコード語と訂正コード語は、一つ以上のRSブロックという単位で管理される。RSブロックとは、後述のRS符号で生成される符号であり、型番、訂正レベルにより符号長及びデータコード語、訂正コード語の割合が決定される。RSブロック内の構造について図2に例を示す。RSブロック内は8ビットを一単位とするサブブロック (以後8ビットブロックと呼ぶ事とする) に分割される。8ビットブロックはデータコード語及び埋め草コード語を主とするコード語Dまたは、コード語から生成される訂正コード語Eに分類できる。型番、訂正レベルで異なる長さの二種類または、同一の長さの一種類のRSブロックが存在する。8ビットブロックはシンボル内において図3のように配置される。主にシンボル向かって右側の領域がデータコード語、左側が訂正コード語になり、二つ以上のRSブロックで構成されるシンボルでは、各RSブロックがインターリーブ配置される。

#### 2.1.3 誤り訂正機能

QRコードは誤り訂正コード語を用い、QRコードの欠損データを復元する機能を持つ。誤り訂正レベルは4段階ある。ここでの欠損割合は、純粋なデータ割合である。また、常に各レベルにおける上限の欠損割合まで復元できるとは限らない。表1にデータ損失例、図4に誤り訂正レベルの関係を示す。

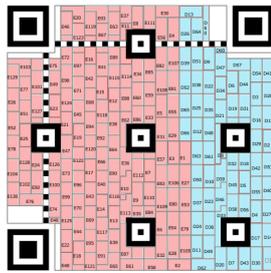


図3 8ビットブロックのシンボル内配置例(型番7, 訂正レベルH)

表1 誤り訂正レベルと復元率

訂正レベル	復元可能なデータ損失割合(概算)
L	7%
M	15%
Q	25%
H	30%

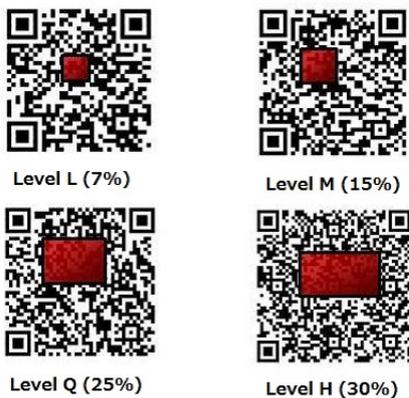


図4 QRコードの損傷と誤り訂正レベルの例

誤り訂正機能とRS符号の関係性については、2.2節で述べる。

## 2.2 Reed-Solomon 符号

$q$  を素数の冪乗とする有限体  $F_q$  上の検査行列

$$H = \begin{pmatrix} 1, & \alpha & \alpha^2 & \dots & \alpha^{n-1} \\ 1, & \alpha^2 & \alpha^4 & \dots & \alpha^{2(n-1)} \\ 1, & \alpha^3 & \alpha^6 & \dots & \alpha^{3(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1, & \alpha^{2t} & \alpha^{4t} & \dots & \alpha^{2t(n-1)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

で定義される線形符号

$$C = \{c \in F_q^n : Hc^t = 0\} \quad (2)$$

をRS符号とよぶ。ここで  $\alpha$  は  $F_q$  における原始元である。RS符号は、符号長  $n = q - 1$ ,  $t \in [1, \lfloor (q-2)/2 \rfloor]$ , 次元  $k = n - 2t$  というパラメータを持つ [6, 7]。RS符号はシングルトンの限界式を等式で満たす最大距離分離符号である。

### 2.2.1 符号の生成

RS符号の符号語に対応する符号語多項式は、

$\{\alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{2t}\}$  を根に持つ。別の表現をすれば、符号多項式は  $F_q$  上で定義される  $n-1$  次以下の多項式であり、次の生成多項式  $g(z)$  をその因子として持つ。

$$g(z) = (z - \alpha)(z - \alpha^2)(\dots)(z - \alpha^{2t}) \quad (3)$$

符号化したい情報系列を  $(m_0, m_1, \dots, m_{k-1}) \in F_q^k$  とするとき、情報系列に対応する多項式を

$$m(z) = m_0 + m_1z + m_2z^2 + \dots + m_{k-1}z^{k-1} \quad (4)$$

と定義する。このとき、式(4)に  $z^r$  を乗じて得られる式は、生成多項式  $g_z$  を用いて

$$g(z)Q(z) = z^r m(z) + R(z) \quad (5)$$

$$R(z) = R_0 + R_1z + R_2z^2 + \dots + R_{r-1}z^{r-1} \quad (6)$$

と書く事ができる。 $R(z)$  は  $r-1$  次の剰余多項式であり  $z^r m(z) + R(z)$  もまた符号多項式となる。

この符号化は、符号中に情報系列が陽に表れる組織符号化となる。また剰余多項式  $R(z)$  の係数系列  $(R_0, R_1, \dots, R_{k-1}) \in F_q^k$  は検査語に対応している。

### 2.2.2 QRコードにおけるRS符号

$q = 2^8$  で定義される短縮RS符号が用いられている。RS符号はRSブロックに対応し、RSブロック内の構造より組織符号化であることは明らかである。また、二つ以上のRSブロックで構成されるQRコードシンボルは情報系列をRSブロック数分に分割され、それぞれが独立した符号化である。独立したRSブロックは訂正レベルにより、符号内の検査符号系列の長さが異なる。表1で示す復号可能な欠損割合は、RSブロック内に含まれる検査符号系列長から算出された値であると分かる。

## 2.3 QRコードの装飾化

進化計算を用いてイラスト入りQRコード\*1を自動生成する方式が提案されている [2]。この方式は、QRコードの誤り訂正機能を利用し、QRコードシンボルとイラストの重ね合わせにより装飾を行う。非対話型と対話型進化計算を融合させたシステムにより、ユーザの趣向とイラストの配置位置、可読性のすべてを満たすQRコードの装飾を行う手法も提案されている [5]。インターフェースによるユーザの趣向の評価以外は自動で装飾を行う。複数のイラストに対応可能であり、またアニメーション入りのQRコードも作成可能である。

また、実際に提供されているサービスとして、QRコードシンボル上に画像を重ね合わせ装飾を行うサービス、ピックアップQRコード\*2や、デザインQR\*3、ロゴQ\*4がある。

\*1 QRコードは株式会社デンソーウェブの登録商標である。

\*2 <http://pictureqr.net/flowers.jp/>

\*3 <http://d-qr.net/>

\*4 ロゴQはA・Tコミュニケーションズ株式会社の登録商標である。<http://logoq.net/logoq/index.html>

ピクチャ QR コードでは、画像の組み合わせ方は 2 種類あり、明モジュール (QR コードシンボルの背景部分)、または暗モジュール (QR コードシンボルの前景部分) と重ね合わせる形になっている。可読性は保証されないため、指定された画像を QR コードに機械的に重ね合わせていると考えられる。ロゴ Q は、イラストを背景とするように QR コードとイラストを重ねた 2 次元コードである。特に、QR コードのモジュールの形状を工夫することで、背面に配置されたイラストの視認性が維持されている点、および、QR コードのエラー訂正能力を使うことなくイラストを重ねている点に特徴がある。ロゴ Q は基本的に、色空間および QR コードに関する知識を持ったデザイナーにより作成されている。

## 2.4 NSGA-II

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) [8-10] は進化的計算法に代表される近似最適化アルゴリズムである。探索する解を個体とみなし、個体集団に対し、選択、交叉、突然変異といった生物の進化過程を模倣した操作を行うことで解を探索を行う。GA は多点探索という特性から、多目的最適化に拡張され、数多くの手法が提案されている。多目的 GA のうち、混雑距離、高速非優越ソート法などを導入した Elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) [11] は、パレート最適フロントに広がる解集団を効率良く探索するために提案された手法である。

## 3. 提案手法

### 3.1 基本方針

本研究で提案する装飾方式は、QR コードの可読性を保ちつつ、QR コードシンボルのモジュールの配置パターンを変化させることができる。あらかじめ定義したイラスト画像に類似するモジュールの配置パターンを試行錯誤的に生成することで、QR コードの視認性、視覚的誘因性の向上が期待できる。また、デコードの障害となるモジュールパターンの発生を考慮する評価基準を設けることにより、視認性と品質とのトレードオフな関係性を満たす QR コード生成を試みる。

本方式の具体的な開発方針を以下に示す。

**方針 1 :** QR コードのエンコーダを独自に開発する  
型番、訂正レベル、マスクパターン及び埋め草コード語が変更可能なエンコーダを開発する。QR コードの可読性を保ち、かつ、QR コードの内部データを操作することで、符号化領域内のモジュールパターン操作を行う。

**方針 2 :** 多目的離散最適化問題へ定式化する  
エンコーダの内部変数の組み合わせを離散最適化問題として定式化する。組み合わせの解探索を効率的に行い、

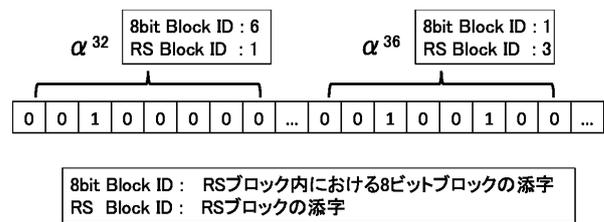


図 5 遺伝子型

かつ、二つの評価指針を満たす複数の解を得るため、多目的最適化アルゴリズム NSGA-II を用いる。

### 3.2 個体表現

シンボル内の埋め草コード語をリスト構造で表現したものを染色体として定義する。図 5 に例を示す。8 つの遺伝子を一区間として得る値は、RS ブロック内の 8 ビットブロックに対応する。表現型は、入力文字列から生成されるビット列と染色体で表される埋め草コード語とを結合し、エンコードした QR コードシンボルとする。

### 3.3 処理手順

本方式は、正解パターンの設定とモジュールパターンの最適化処理からなる。正解パターンはあらかじめ定義したイラスト画像、型番、訂正レベル、マスクパターンおよび入力文字列により決定する。

#### Step 1. 正解パターンの設定

- (1) 型番、訂正レベル及び QR コード化する文字列を決定する。
- (2) イラストを型番の大きさにリサイズ、ピクセル毎の RGB 値より算出した輝度値と判別分別法による二値化処理を行う。
- (3) 二値化画像の暗色を前景領域、明色を背景領域とする。
- (4) 二値化画像と、あらかじめ定義したマスクパターンとの排他的論理和をとる。
- (5) (4) で得られたイラストのうち暗色を 1、明色を 0 とし、モジュールからビット列を取得する。
- (6) ビット列を RS ブロックに分解し、RS ブロック内の 8 ビットブロックに前景領域または背景領域のラベルを割り当てる。

#### Step 2. モジュールパターンの最適化

- (1) 入力文字列、型番、訂正レベルから、埋め草コード語の容量を決定する。
- (2) 埋め草コード語をランダムに生成した初期個体集団を生成する。
- (3) 個体集団を QR コードシンボルにエンコードする。
- (4) 個体集団を、式 (7)、式 (8) を用いて評価する。
- (5) 全個体にランクを割り当て、各フロントごとに混雑距離を計算する。

- (6) 混雑距離をもとにしたトーナメント選択を行う。
- (7) 交叉, 突然変異により子個体群を生成する。
- (8) (3) から (7) を一定回数まで繰り返す。
- (9) 終了

### 3.4 適応度の評価

生成された QR コードの適応度を, あらかじめ定義したイラストとの類似度, デコード品質の二つの指標を目的関数とした値から算出する. 適応度の評価の例を図 6 に示す.

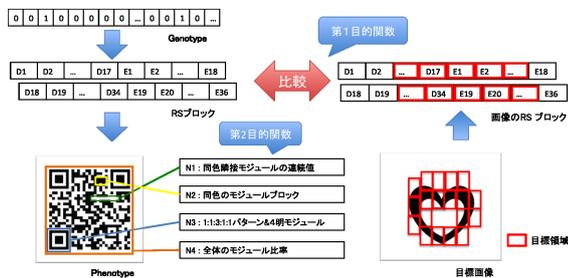


図 6 適応度の評価

#### 3.4.1 第 1 目的関数

与えられた目標画像と QR コードのモジュールパターンとの一致度を第 1 目的関数とし, 以下のように算出する. QR コードシンボル中の,  $i$  番目の RS ブロック内に含まれる  $N$  個の埋め草コード語からなるベクトルを,  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$  とする. QR コードシンボル中に含まれる  $M$  個の RS ブロックと, イラスト画像との類似度を評価するための関数を,

$$S(x_1, \dots, x_M) = \arg \max_x \left[ 1 - \frac{\sum_K \sum_L d(C_{kl})}{K \times L \times 8} \right] \quad (7)$$

$$C_{kl} = \begin{cases} x_{kl} & (C_{kl} = \text{PadCode}) \\ f_k(x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kN}) & (C_{kl} = \text{ErrCorrectionCode}) \end{cases}$$

と定義する.  $L$  はイラスト画像中の前景領域に対応する RS ブロック中に含まれる埋め草コード数,  $K$  は前景領域が含まれる RS ブロック数である. また, イラストを 8 ビットブロックに分解し, 理想的な 8 ビットブロックの値を基準としたハミング距離を  $d(C)$  とする.  $C$  は埋め草コード語または, 訂正コード語の 8 ビットブロックの値である.  $f_k$  は, RS 符号の生成行列  $G$  の標準形における,  $k$  列目と  $x_k$  との内積により算出される.

#### 3.4.2 第 2 目的関数

QR コードの機械可読性を表す指標に基づく QR コードの品質を第 2 目的関数とする. 4 つの基準から求める失点の重み係数を,  $N_1 = 3, N_2 = 3, N_3 = 40, N_4 = 10$  と定義する. これは, QR コードをエンコードする過程で用いるマスクパターンの失点数 [1] を基準に算出される値であ

表 2 パラメータ

世代数	5000
交叉法	一様交叉
交叉率	50 %
突然変異率	5 %

る. 各係数から算出される評価関数を  $y = (y_1, y_2, y_3, y_4)$  を用いて,

$$Q(y) = \arg \max_y \left[ 1 - \frac{\sum_{i=0}^4 N_i y_i}{\text{MaxLostPoints}} \right] \quad (8)$$

と定義する.  $y_i$  は各失点の発生個数を表す.

QR コードエンコーダ内では 8 つのマスクパターンの中から, 相対的に失点数の低いものを選択する. 本研究では処理の始めにあらかじめマスクパターンを固定するため, 相対的な評価を行うことができない. よって, 失点が最大となる値を基準に失点を算出する. 最大失点数  $\text{MaxLostPoints}$  は型番別に定義する. 本研究では, シンボル内のデータコード語領域がすべて暗色モジュールの時失点をの最大値とした.

## 4. 実行例

図 7 における入力イラスト画像において, 本研究で提案する方式から得られた QR コード, および, 第一目的関数  $S$ , 第二目的関数  $Q$  の適応度を図 8 に示す. また, 図 8(a), 図 8(b), 図 8(c), 図 8(d) は非劣解, 図 8(e), 図 8(f), 図 8(g), 図 8(h) は劣解を示す. 生成された QR コードシンボルは, モジュールの配置パターンは様々であるが, イラストの形状が確認出来るものが多く含まれている. 機械可読性を示す品質も高い数値であることが確認できた.

実行例において, NSGA-II で使用したパラメータを表 2 に示す. また, エンコードする際の QR コードの型番, 訂正レベル, および入力文字列をそれぞれ, 10, M, kagoshima とした.

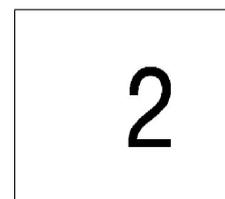


図 7 入力イラスト画像 1

## 5. 考察

QR コードシンボル内のモジュールパターン生成における難しさを, イラストとの類似度の観点から考える. 評価関数  $S$  はイラストの前景領域 (暗色領域) の位置の違いに

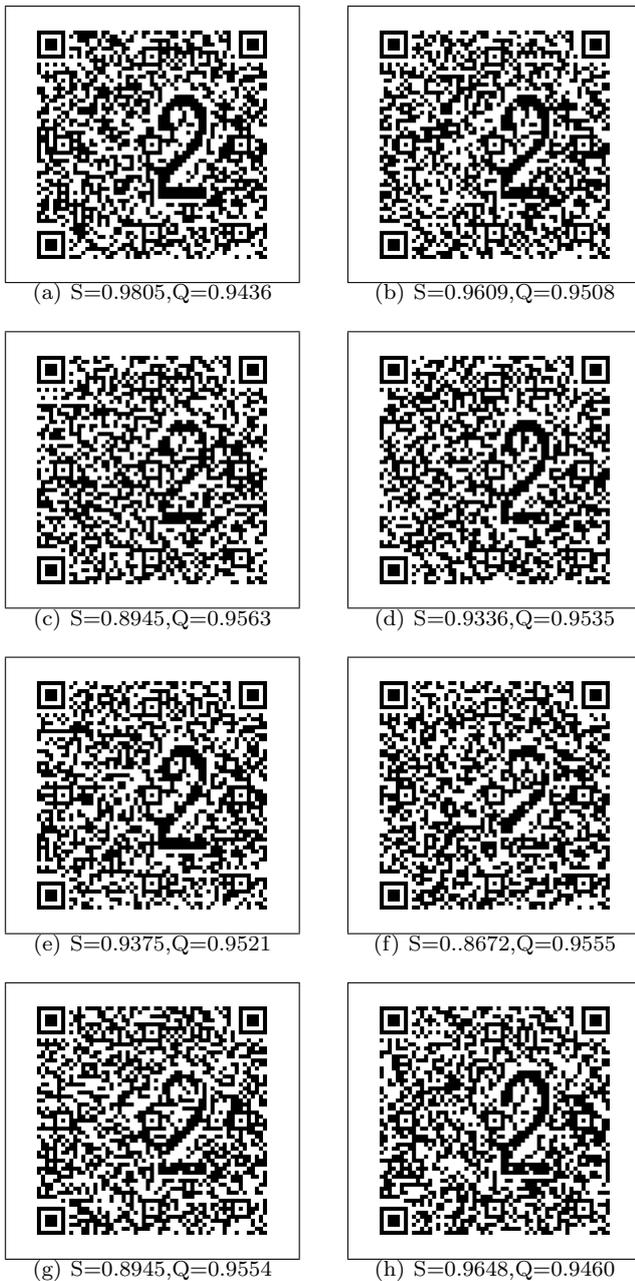


図 8 入力イラスト画像

より、設計変数間に依存関係が生じる。

シンボル内の  $i$  番目の RS ブロック内にある  $j$  番目の誤り訂正コード語  $E_{ij}$  は、 $i$  番目の RS ブロック内のすべてのデータコード語  $D_i$  から算出される値である。すなわち、RS ブロック内のデータコード語数を  $N$  とするとき、各誤り訂正コード語  $E_{ij}$  は、 $N$  変数関数とみなすことができる。

イラストの前景領域が、データコード語  $D$ 、訂正コード語  $E$  の両方、または、訂正コード語のみ領域に存在するとき、評価関数  $S$  は  $D$  を媒介変数とする  $E$  の多変数関数となり、変数間に依存関係が生じる。

また、QR コードの誤り訂正レベルが上がるほど、シンボル内の訂正コード語領域が増加するため、同一のイラストであっても、類似度の高いモジュールの配置パターンを

生成することは困難となる。

## 6. おわりに

二次元コードの視認性と品質を考慮した装飾手法について提案した。モジュールの配置パターンを多目的遺伝的アルゴリズムである NSGA-II を用いて視認性とデコード品質とを考慮した QR コードの作成を試みた。

モジュールの配置パターンの検定的な生成には誤り訂正レベル、イラストの位置、大きさなどの複数の条件により難易度が異なる。特に、訂正レベルが高く、イラストの前景領域がシンボル内の広い位置を占めるとき、モジュールの一致度の高い RS 符号の生成が難しくなる。また、モジュールの一致度が必ずしも視認性に直結するとは限らない。視認性をモジュールの一致度とは別の基準で評価することで視覚的誘因性の高い多様な QR コードの生成が期待できる。

## 参考文献

- [1] JISX0510, “二次元コードシンボル-QR コード-基本仕様”, (2004).
- [2] S.Ono, K.Morinaga, S.Nakayama “Barcode Design by Evolutionary Computation”, *Artificial Life and Robotics*, Vol.13, No.1, pp.238-241, (2008).
- [3] 若原 俊彦, 山元 規靖, 越智 祐樹 “QR コードの画像情報多重化法の一検討”, 電子情報通信学会技術研究報告, ライフインテリジェンスとオフィス情報システム, p41-45, (2010)
- [4] 藤田 和謙, 栗林 稔, 森井 昌克 “QR コードへの画像埋め込みに関する検討と提案”, 電子情報通信学会技術研究報告, ライフインテリジェンスとオフィス情報システム, p39-44, (2011)
- [5] S.Ono, S.Nakayama, “Fusion of Interactive and Non-Interactive Evolutionary Computation for Two-Dimensional Barcode Decoration”, *IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 2570-2577 (2010).
- [6] 今井秀樹, “符号理論”, 電気情報通信学会, (1990).
- [7] 和田山正, “誤り訂正技術の基礎”, 森北出版, (2010).
- [8] David E. Goldberg “Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning”, Addison Wesley, Reading, (1989).
- [9] David E. Goldberg “An investigation of niche and species formation in genetic function optimization”, *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pp.42-50, (1989).
- [10] 棟朝雅晴, “遺伝的アルゴリズム-その理論と先端的手法-”, 森北出版, (2008).
- [11] K.Deb, Associate Member, IEEE, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. Meyarivan “A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II” *IEEE TRANSACTIONS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, VOL. 6, NO. 2, APRIL (2002)